氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

中国动植物自然物候长序列数据集研制

罗岚心 陈东辉 任芝花

Development of a Long-series Phenological Dataset of Plants and Animals in China

LUO Lanxin CHEN Donghui REN Zhihua

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20165

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

土壤数据集对全球陆面过程模拟的影响

Impact of Soil Datasets on the Global Simulation of Land Surface Processes

气候与环境研究. 2020, 25(5): 555 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20025

中国区域平均降水量序列构建方法比较研究

Construction Method for Regionally Average Precipitation Time Series in China

气候与环境研究. 2021, 26(1): 45 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20012

ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估

Evaluation of Near-Surface Wind Speed Climatology and Long-Term Trend over China's Mainland Region Based on ERA5 Reanalysis

气候与环境研究. 2021, 26(3): 299 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20101

基于和数据分析中国北方典型地区气溶胶单次散射反照率的变化趋势

Analysis of the Change Trend of Aerosol Single-Scattering Albedo in the Areas of Northern China Based on AERONET and OMI Data

气候与环境研究. 2019, 24(5): 537 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18006

基于均一化观测序列的京津冀地区气候变化格局分析

Analysis of Climate Change in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Homogenized Observations

气候与环境研究. 2018, 23(5): 524 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17054

模型对年中国东北地区潜在植被分布和碳循环的模拟研究

Simulation of Potential Vegetation Distribution and Carbon Cycle in Northeast China from 1997 to 2010 by LPJ-WHyMe Model

气候与环境研究. 2019, 24(6): 678 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19033

关注微信公众号，获得更多资讯信息

罗岚心, 陈东辉, 任芝花. 2021. 中国动植物自然物候长序列数据集研制 [J]. 气候与环境研究, 26(6): 691−702. LUO Lanxin, CHEN Donghui, REN Zhihua. 2021. Development of a Long-series Phenological Dataset of Plants and Animals in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (6): 691−702. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20165

中国动植物自然物候长序列数据集研制

罗岚心 陈东辉 任芝花

国家气象信息中心, 北京 100081

摘 要 中国气象档案馆馆藏 1981 年以来的木本、草本、虫鸟两栖动物自然物候观测资料，是现有中国境内覆盖范围最广、持续时间最长的自然物候观测数据。通过对数字化档案与电子报文进行数据清洗与质量控制，研制出 1981～2018 年中国动植物自然物候长序列数据集，分为木本、草本、虫鸟两栖动物 3 个子集。其中草本植物子集样本 13936 条，42 个物种，12 种物候期，数据实有率 94.8%；木本植物子集样本 36495 条，111 个物种，18 种物候期，数据实有率 78.3%；虫鸟两栖动物子集样本 15513 条，18 个物种，2 种物候期，实有率 95.9%。以北京地区木本植物物候数据分析为例，验证了该地区物候变化与现有气候变化研究结论相吻合。

关键词 自然物候 木本植物 草本植物 虫鸟两栖动物 数字化

文章编号 1006-9585(2021)06-0691-12 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20165

Development of a Long-series Phenological Dataset of Plants and Animals in China

LUO Lanxin, CHEN Donghui, and REN Zhihua

National Meteorological Information Center, *Beijing* 100081

Abstract Since 1981, the Chinese Meteorological Archives has collected the phenological records of plants, insects, birds, and amphibious animals. These records were observed over a long time by agrometeorological stations in many provinces. After a series of steps involving data cleaning, quality control, and other qualified processing, the Phenophase Dataset of plants and animals in China (1981–2018) was made. The subset of herbaceous plants has 13936 rows with 42 species. The subset of woody plants has 36495 rows with 111 species. The third subset comprises birds, insects, and amphibious animals and has 15513 rows with 18 species. Results of the data analysis were consistent with the existing climate change data.

Keywords Phenology, Wood, Herb, Insects−birds−amphibious animals, Digitization

1 引言

动植物的物候现象是指动植物在自然环境中随着季节变化的生长响应，对于草本植物与木本植物，主要观测记录其芽、叶、花、果的状态变化；对于候鸟、昆虫及两栖动物，主要观测记录其行踪与鸣叫的始终日期。动植物的物候现象能反应环境的变化程度，是研究和适应气候变化最有利的证据和重

收稿日期 2020-12-28；**网络预出版日期** 2021-06-08

作者简介 罗岚心，女，1992 年出生，硕士，工程师，从事气象数据产品研发。E-mail: luolx@cma.gov.cn

通讯作者 任芝花，E-mail: rzh@cma.gov.cn

资助项目 国家气象信息中心青年科技基金 NMICQJ202002

Funded by Project supported by the Special Foundation for Young Scientists of National Meteorological Information Center (Grant NMICQJ202002)

要参考资料，被称为全球气候变化的指纹（van Vliet et al., 2003; 张凤华等, 2011; Hur et al., 2014; 刘亚辰等, 2014; Fang et al., 2015; 徐韵佳等, 2015; Casey and Daehler, 2018）。

从 18 世纪初西方国家陆续开始现代自然物候学的研究，并将研究结果应用于农业、园艺等领域（Lieth, 1975）。瑞典植物学家 Carolus Linnaeus（1707～1778 年）因系统地记录了瑞典 18 个地区开花的气候条件，被称为现代气候学之父。紫丁香观测网（The Lilac Network）、美国国家物候观测网（Rosemartin et al., 2018）、加拿大 PlantWatch 社群、法国 TEMPO 项目、瑞典物候观测网、荷兰物候观测项目 de natuurkalender、印度物候网 SeasonWatch 以及欧洲物候观测网（van Vliet et al., 2003）为世界物候研究提供海量观测资料，观测点分布密集且最早观测记录在 1936 年。全球变化科学研究数据出版系统为中国地区的物候研究提供大量数据集产品，如中国物候观测网北京站典型植物物候观测数据（http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=123[2021-10-20]）；中国白蜡树春季物候期网格数据（http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=130[2020-10-20]）；中国 2000～2010 年东北森林遥感监测物候期分布数据（http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=136[2020-10-20]）；其他的植被生长指数数据如江西、长江中游、湖北、湖南等地的植被生长季时长数据集，由南京师范大学地理科学学院贡献。此外，中国生态系统研究网络（CERN) 也开展了一系列观测与科研活动，发布 CERN22 个生态站 1988～2018 年观测的植物物种名录数据集（张琳等, 2020）。2009～2018 年神农架 17 种优势植物物候观测数据集（马博宇等, 2020）、2003～2015 年 CERN 植物物候观测数据集（宋创业等, 2017），是国内多种草本、木本植物物候期综合整编的数据集产品。

中国气象局农业气象观测站自 20 世纪 80 年代起就开始大规模的自然物候专业观测，相同站点的观测植株相对固定，观测持续时间长，是国内难得的空间覆盖率大、持续时间长、质量稳定的自然物候历史观测资料。早期的数据服务以抄录为主，因格式复杂、物种名不规范等问题，该资料没有得到有效的利用，资料价值体现不明显，随着中国气象局历史档案保护行动开展（张强等, 2016; 高静等, 2018），历史农业气象观测档案通过光学自动文字识别技术与机器学习分类技术完成数字化，再经正确性检查、资料完整性检查、人工数据质检、格式整编和质量控制等过程，形成中国动植物自然物候长序列数据集（1981～2018 年）。该数据集分草本、木本与候鸟昆虫 3 个子集，具备完整的站点元数据说明，并标注了数据质量控制码，可作为卫星遥感数据矫正的验证数据，也可为全球气候变化研究、动植物生态学研究提供基础数据支撑。

2 数据集简介

2.1 资料来源

数据来源于中国气象局农业气象站业务观测记录，观测数据质量稳定。站点纬度跨越 18°50'N～51°44'N，经度跨越 75°59'E～134°17'E。其中 1981～2012 年数据是中国农业气象纸质年报表的数字化成果，2013～2018 年数据来自于各省农业气象站的农业气象观测电子年报表。数据集包含草本、木本、动物 3 类物候期子集，木本植物物候期 18 项（表 1），草本植物物候期 12 项（表 2），候鸟、昆虫与两栖动物物候期两项，即初鸣（初见）、终

表 1 中国动植物自然物候观测数据集中木本植物物候期名

Table 1 Phenology of woody plants in the Phenophase Dataset of plants and animals in China

序号	物候期名	序号	物候期名
1	芽膨大期（花芽）	10	开花期末期
2	芽膨大期（叶芽）	11	第二次开花
3	芽开放期（花芽）	12	果实或种子成熟期
4	芽开放期（叶芽）	13	果实脱落期始期
5	展叶期始期	14	果实脱落期末期
6	展叶期盛期	15	秋叶变色始期
7	花蕾花序出现期	16	秋叶变色全变
8	开花期始期	17	落叶期始期
9	开花期盛期	18	落叶期末期

表 2 中国动植物自然物候观测数据集中草本植物物候期名

Table 2 Phenology of herbaceous plants in the phenophase dataset of plants and animals in China

序号	物候期名	序号	物候期名
1	前动期	7	果子成熟始期
2	展叶期始期	8	果子成熟全熟期
3	展叶期盛期	9	果子脱落散布期
4	开花期始期	10	枯黄期始期
5	开花期盛期	11	枯黄期普遍期
6	开花期末期	12	枯黄期全枯期

鸣（终见）日期。各物候期的相关概念界定可参考《中国物候观测方法》（宛敏谓和刘秀珍, 1979）与《农业气象观测规范》（中国气象局, 1993）。数据为日期格式，精确到天。

2.2　数据预处理

预处理过程包含格式标准化、物种名标准化、台站元数据处理处理。

2.2.1　格式与物种名标准化

由于 1993 年农业气象观测规范修订，木本植物的物候期被细化（如：花芽与叶芽的“芽开放期”分为两项，新增“果实脱落期”等项目），物候观测项目从 12 项增至 18 项。为统一数据集格式，均采用特征值−999 表示该时间段内无观测记录，但在计算数据集实有率时，刨除无观测任务的数据缺失值影响。

因早期观测对象名不规范、手写体识别偏差等原因，同一物种在不同地区的记录中存在多种别称（如车前、车前子、车前草），需要统一。通过非恒定 Jaccard 相似度评价系数（Niwattanakul et al., 2013）作为聚类算法的簇距，将物种名集合聚类分组。以分组清单作为物种名匹配的参考指标，对照观测规范、农气观测数据编码表和植物百科全书，生成物种名对照替换列表。对照替换列表在经过农气专家逐一审核修订后，再用于物种名标准化处理，同时保留各站物种名标准化前的物种信息作为补充说明文档。相似度评价系数计算公式为

$$D=\frac{|A\cap B|}{|A\cup B|}=\frac{\min\left(|A_w|,\ |B_w|\right)}{\max\left(|A_w|,\ |B_w|\right)},\qquad(1)$$

其中，物种名 A、B 分别作为一个单词，采用二元变量类型，将每个中文字符作为二元变量 w 的一个属性，计算 A、B 相似度评价系数 D。标准化成效可见表 3。相似度评价系数 D 非物种名标准化的唯一指标，如“玉兰”与“黄玉兰”虽相似度很高，但前者多指落叶乔木，后者是常绿乔木，物候期有所不同，故标准化过程不会将二者合并到同一物种，“大叶榆”与“大叶杨”也不会被处理为一个物种。

表 3　物种名标准化成效

Table 3　Standardization of species name

分类	物种名	
	标准化前（种）	预处理后（种）
木本植物	367	111
草本植物	149	42
虫鸟两栖动物	67	18

2.2.2　台站元数据处理

统一台站位置信息表示形式，将经纬度单位统一转换为两位小数的“度”，海拔高度转化为一位小数的“米”，统一修正经纬度倒置错误；以站号为索引，利用前后资料的站点元数据补充缺失的位置信息；对照台站沿革数据，分析同一站点是否有迁移史或单纯的位置飘移，再次修订，具体数据见表 4。

表 4　台站元数据处理成效

Table 4　Standardization of stations information

分类	站点信息条数		冗余率
	原有	处理后	
木本植物	642	401	37.5%
草本植物	459	231	49.7%
虫鸟两栖动物	356	229	35.7%

注:冗余率=（原有数量−现有数量）/原有数量×100%。

2.2.3　数据处理

数据处理过程包括要素提取、正确性检查、完整性检查、格式检查、人工核对、数据清洗、数据整编。其中数据清洗对象有非观测规范指定的物种

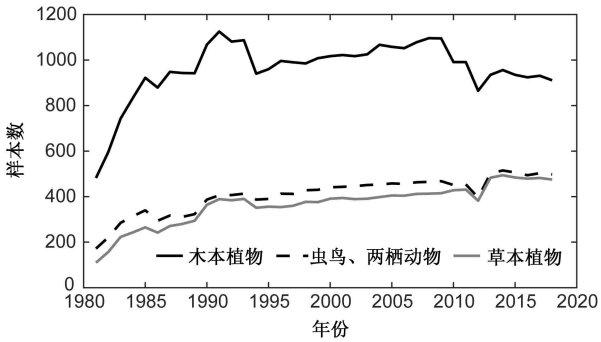

图 1　中国动植物自然物候观测数据集样本量时序

Fig. 1　Annual records of the Phenological Observation Dataset

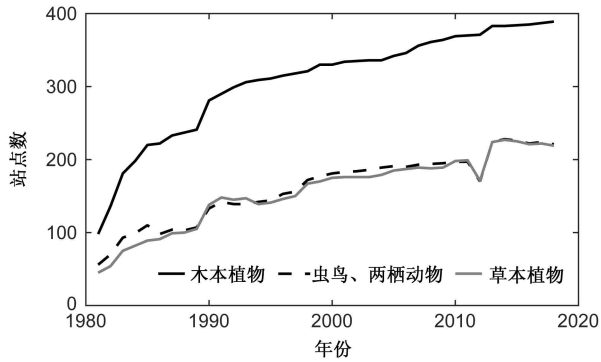

图 2　中国动植物自然物候观测数据集站点数时序

Fig. 2　Records per station of the Phenological Observation Dataset

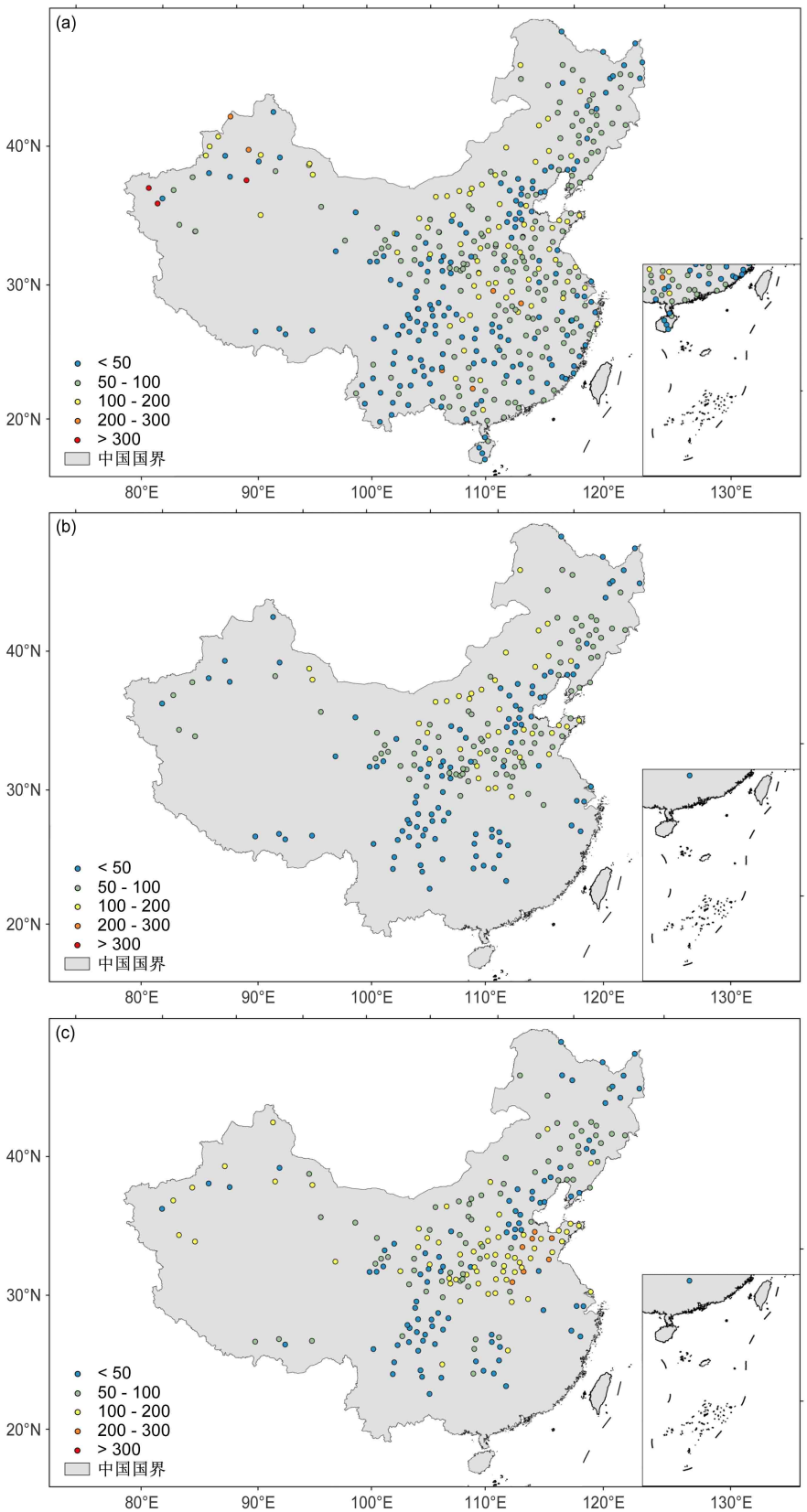

图 3 中国动植物自然物候观测数据集站点及样本量空间分布：（a）木本植物观测；（b）草本植物观测；（c）虫鸟两栖动物

Fig. 3 Special distribution of agrometeorological observation stations: (a) Woody plants; (b) herbaceous plants; (c) birds, insects, and amphibious animals

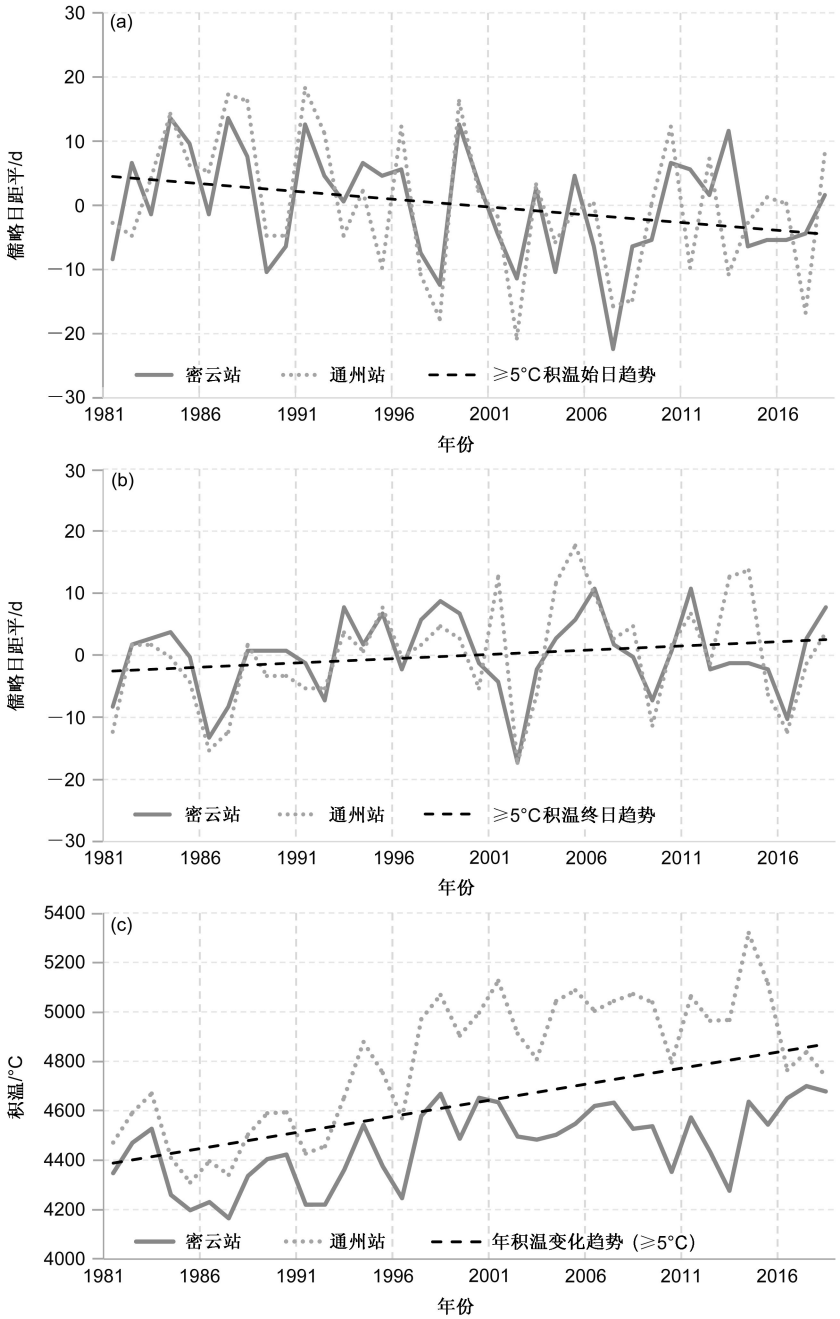

图 4　北京积温（a）始日序列和（b）终日序列及（c）1981～2018 年北京地区年积温序列

Fig. 4　(a) First day and (b) last day of the effective accumulated temperature in Beijing; (c) effective accumulated temperature in Beijing from 1981 to 2018

记录、非自然物候观测任务站点的零碎记录、被错误分类的资料和其他错误记录。一个样本指一个物种一年完整的物候观测记录。完成清洗的各物种样本量随时间的变化情况如图 1 所示，完成清洗的观测站点数时间序列如图 2。1981～1993 年农业气象观测对象未统一标准，随着农气站点数的增加，观测样本量也上升。1994 年观测业务规范出台，部分物种停止继续观测，导致样本量下降，以木本植物样本量下降最为明显。随后观测样本量趋于稳定。2012 年农业气象观测业务变更，试运行第一年，部分站点未上报草本植物与虫鸟动物的观测资料，部分木本植物观测资料上报不全，导致样本量骤减，之后数据再次回归平稳。

2.3　数据质量控制与评估

2.3.1　数据质量控制

数据集质量控制分为两级。初级质控基于数据

完整性、气候界限值进行检验，先标记缺测数据，再根据质控结果标记疑误数据。由于生物多样性，各物种的物候期不尽相同，故基于3-σ标准原则，判断物候期所在的气候学界限。以42种草本植物物12种候期为例，i表示物种编码，j表示物候期编码，计算各物种各物候期的多年儒略日平均值$\boldsymbol{M}$矩阵为

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} M_{1,1} & \cdots & M_{1,12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{42,1} & \cdots & M_{42,12} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

第i个物种第j个物候期的数据质量情况$D_{\mathrm{ate}i,j}$如下：

$$D_{\mathrm{ate}i,j}=\begin{cases} \text{在}M_{i,j}\pm 2\sigma\text{区间内正确}, \\ \text{在}M_{i,j}\pm 2\sigma\text{区间外可疑}, \\ \text{在}M_{i,j}\pm 3\sigma\text{区间外错误}. \end{cases} \tag{3}$$

其中σ为标准差。

二级质控基于积温理论，结合逐日气温资料，利用SW春暖物候模型对草本、木本植物的展叶期进行检验，将不符合模型的物候期标记为可疑（Parmesan and Yohe, 2003; Rosenzweig and Tubiello, 2007; Wang et al., 2015a）。积温S与生长强迫函数R_{f}的关系如下：

$$S=\sum_{t_1}^{t_{\mathrm{b}}} R_f(x_t), \tag{4}$$

其中，t_1表示物候期开始日温度，t_{b}表示物候期出现当日温度，生长强迫R_{f}函数基于Sigmoid函数（S型生长曲线）拟合：

$$R_{\mathrm{f}}(x_t)=\begin{cases} 0 & x_t<0, \\ \dfrac{\alpha}{1+\mathrm{e}^{-\beta(x_t-t_{\mathrm{b}})}} & x_t>0, \end{cases} \tag{5}$$

其中α与β为拟合参数，随物种改变，因篇幅所限这里省略各物种拟合参数表。

2.3.2 数据质量评估

统计每个物候期的完整率和可用率，并分析其时空变化情况：

$$P_{\mathrm{I}}=\frac{\sum_{i=1}^{N} S_i}{\sum_{i=1}^{N} Y_i}\times 100\%, \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{r}}=\frac{\sum_{i=1}^{N} R_i}{\sum_{i=1}^{N} Y_i}\times 100\%, \tag{7}$$

$$P_{\mathrm{E}}=\frac{\sum_{i=1}^{N} E_i}{\sum_{i=1}^{N} Y_i}\times 100\%, \tag{8}$$

$$P_{\mathrm{S}}=\frac{\sum_{i=1}^{N} D_i}{\sum_{i=1}^{N} Y_i}\times 100\%, \tag{9}$$

$$P_{\mathrm{L}}=1-P_{\mathrm{I}}. \tag{10}$$

其中，P_{I}为数据集实有率，P_{r}为可用率，P_{E}为错误率，P_{S}为可疑率，P_{L}为缺测率。实际评估工作中，n代表观测对象（物种）数量，木本植物111个，草本植物42个，虫鸟动物18个。Y_i为应有数据量，是第i个物种的样本总数：以虫鸟动物子集为例，假设i=10表示“大雁”，有样本306条，则Y_{10}=306×2（物候期项数）。其中，1993年前木本植物有6项物候无观测任务，不计入应有数据量。S_i为实有数据量，是第i个物种非缺测的数据总量；R_i为正确数据量，是第i个物种通过质量控制，质控码标记正确的数据总量。E_i为错误数据量，是第i个物种通过质量控制，质控码标记为错误的数据总量。D_i为可疑数据量，是第i个物种通过质量控制，质控码标记为可疑的数据总量。

经统计数据集共有木本植物样本36495条，草本植物样本13936条，虫鸟两栖动物样本15513条，数据错误率均小于1/10000，其余评估指标结果如表5：草本植物、虫鸟动物子集的可用率都超过90%，木本植物因自身生物特性，部分物候期无法观测，又不属于无观测任务条件，故可用率相对较低。其中“花芽膨大期”“花芽开放期”“果实脱落期”的可用率都在60%左右，但是展叶、开花相关的物候期，可用率均高于90%；草本植物数据可疑率小于1/1000，近似为0，以“果实脱落期”的质量最次，可用率78.2%，可疑率12.8%；虫鸟两栖动物子集中“始鸣期（始见期）”的数据完整性和可用率都略高于“终鸣期（绝见期）”，整体数据可用率95.9%，质量较好。

表5 中国动植物自然物候观测数据集质量评估结果

Table 5 Assessment of the Phenophase Dataset of plants and animals in China

分类	评估指标			
	可用率	可疑率	缺测率	实有率
草本植物	94.8%	0	5.2%	94.8%
木本植物	77.7%	0.6%	21.7%	78.3%
虫鸟两栖动物	94.9%	1.0%	4.0%	95.9%

表6为处理后样本实有率。因木本植物自身的生长特点导致部分物候期天然缺失，如刺槐等裸芽植物，无芽膨大期观测记录，故实有率平均值偏低。数据集中，可用率超过95%的物种12个，介于80%～95%的物种50个，占物种总量的44.6%。

表 6 木本植物样本实有率

Table 6 Integrity of each woody species

序号	物种名	拉丁文学名	实有率	序号	物种名	拉丁文学名	实有率
1	丁香	Syringa	83.8%	57	榆树	Ulmus pumila	82.6%
2	中东杨	Populus berolinensis dippel	98.4%	58	槐树	Sophora japonica	82.4%
3	乌桕	Sapium sebiferum	82.6%	59	槭树	Acer saccharum Marsh.	58.8%
4	二白杨	Populus gansuensis C. Wang et H. L. Yang	54.7%	60	樱桃	Cerasus serrulata	66.3%
5	侧柏	Thuja orientalis	58.2%	61	樱花	Cerasus yedoensis	75.3%
6	凤凰木	Delonix regia (Boj.) Raf.	71.7%	62	橘红	Citrus maxima (Burm.) Merr. cv. Tomentosa	58.8%
7	刺槐	Robinia pseudoacacia	83%	63	橙	Citrus sinensis	59.4%
8	加拿大杨	Populus canadensis	85.7%	64	橡胶	Hevea brasiliensis	71%
9	北京杨	Populus beijingensis W. Y. Hsu	73.9%	65	毛白杨	Populus tomentosa	82.6%
10	合欢	Albizia julibrissin Durazz.	80.5%	66	水杉	Metasequoia glyptostrobides	77.4%
11	垂杨	Salix babylonica	84.4%	67	沙果	Malus asiatica Nakai	66.7%
12	垂柳	Salix babylonica Linn.	80.4%	68	沙枣	Elaeagnus angustifolia Linn.	83.3%
13	大叶杨	Populus lasiocarpa Oliv.	88.7%	69	油桐	Aleurites forqii	91.7%
14	大叶榆	Ulmus laevis	94.1%	70	油茶	Camellia oleifera	69.1%
15	小叶杨	Populus simonii	80.4%	71	泡桐	Paulownia fortunei	80.8%
16	山柏杨	Populus davrdrana	94.1%	72	海棠	Malus	74.1%
17	山楂树	Crataegus pinnatifida	66.2%	73	牡丹	Paeonia suffruticoss	81.1%
18	山荆子	Malus baccata (L.) Borkh	79.5%	74	玉兰	Yulan Magnolia	68.1%
19	怪柳	Tamarix chinensis Lour.	95.1%	75	玫瑰	Rosa rugosa Thunb.	77%
20	悬铃木	Platanus orientalis	82.4%	76	珍珠梅	Sorbaria sorbifolia (Linn.) A. Br.	75.6%
21	扁桃	Amygdalus communis Linn.	100%	77	白梨	Pyrus bretschneideri Rehd.	90%
22	探春花	Jasminum floridum Bunge	87.6%	78	白蜡	Fraxinus bungeana DC.	78.8%
23	文冠果	Xanthoceras sorbifolium Bunge	100%	79	皂角	Gleditsia sinensis Lam.	76%
24	新疆杨	Populus alba	85.3%	80	石榴	Punica granatum L.	85.6%
25	无患子	Sapindus mukorossi Gaertn.	82.4%	81	箭杆杨	Populus nigra cv. Afghanica	85.3%
26	无花果	Ficus carica linn	50.9%	82	紫丁香	Syringa oblata	85.3%
27	旱柳	Salix matsudana	85.5%	83	紫穗槐	Amorphafruticosa	79.4%
28	木棉	Gossampinus malabarica	79.4%	84	紫荆	Bauhinia blakeana Dunn.	82.4%
29	木槿	Hibiscus syriacus	73%	85	紫薇	Lagerstroemia indica	81.7%
30	木油桐	Aleurites montana	84.6%	86	紫藤	Wisteria sinensis (Sims) Sweet	80.9%
31	杉树	Taxodiaceae	59.6%	87	红果树	Stranvaesia davidiana Dcne.	76.5%
32	李子树	Prunus cerasifera Ehrh.	86.3%	88	胡桃树	Juglans regia Linn.	64.7%
33	杏	Prunus armeniaca	89.2%	89	腊梅	Chimonanthuspraecox	65.7%
34	杜梨	Pyrus betulifolia Bge.	87.1%	90	臭椿	Ailanthus altissima (Mill.) Swingle	68.2%
35	杨树	Salicaceae	83.6%	91	芒果	Mangifera indica	48.8%
36	板栗	Castanea mollssima	83.7%	92	花椒	Zanthoxylum bungeanum Maxim	64.7%
37	枇杷	Riobotrya japonica (Thunb.) Lindl	56.7%	93	苹果	Malus pumila	86.2%
38	红果树	Stranvaesia davidiana Dcne.	72.9%	94	苹果梨树	Tamarix chinensis Lour.	66.1%
39	枣树	Zizyphus jujuba	82.1%	95	茶花	Camellia japonica L.	49.1%
40	枫香	Liquidambar formosana	83.7%	96	荔枝	Litchi chinensis Sonn.	85.1%
41	枸杞	Lycium chincnse Mill.	81%	97	落叶松	Larix gmelinii (Ruprecht) Kuzeneva	41%
42	柏树	Cupressaceae	57.5%	98	葡萄	Vitis vinifera	82.8%
43	柑	Citrus reticulata	56.3%	99	辽河杨	Populus maximowiczii Henry	83.5%
44	柚	Citrus maxima (Burm.) Merr.	59.4%	100	迎春花	Jasminum nudiflorum Lindl.	64.7%
45	柠檬	Citrus limon (L.) Burm. F.	55.3%	101	酸橙	Citrus aurantium Linn.	64.7%
46	柿	Diospyros kaki Thunb.	85.6%	102	钻天杨	Populus nigra L.cv. Italica	87.8%
47	核桃	Juglans regia	85.8%	103	银杏	Ginkgo biloba	69.5%
48	桂花	Osmanthus fragrans	55%	104	银白杨	Populus alba L.	87.8%
49	桃	Amygdalus persica Linn	84.6%	105	锦鸡儿	Caragana	72.5%
50	桉	Eucalyptus robusta Smith	41.2%	106	雪梨	Pyrus bretschneideri Rehd	100%
51	桑树	Morus alba	81.1%	107	青杨	Populus cathayana Rehd.	70.6%
52	梓	Catalpa ovata G. Don	73.2%	108	馒头柳	Salix matsudana var. matsudana f. umbraculifera Rehd.	94.4%
53	梧桐	Firmiana simplex	84.1%	109	密香梨	Pyrus spp	88.2%
54	梨	Pyrus bretschneideri Rehd.	86.9%	110	香樟	Cinnamomum camphora (L.) Presl.	59.7%
55	楝树	Melia azedarach	82.1%	111	龙爪槐	Sophora japonica Linn. var. japonica f. pendula Hort.	78.3%
56	楸	Catalpabungei C.A.Mey	91.2%				

表 7 草本植物样本实有率

Table 7 Integrity of each herbaceous species

序号	物种名	拉丁文学名	实有率
1	冰草	Wheatgrass	93.4%
2	凤仙花	Impatiens balsamina L.	100%
3	地黄	Rehmannia glutinosa (Gaetn.) Libosch. ex Fisch. et Mey.	80.1%
4	寸草苔	Carex duriuscula C.A.Mey.	90%
5	小毛茛	Ranunculus ternatus Thunb.	100%
6	忘忧草（金针菜）	Hemerocallis citrina	80.2%
7	披碱草	Elymus dahuricus Turcz.	100%
8	拟金茅	Eulaliopsis binata (Retz.) C. E. Hubb.	62.5%
9	木耳菜	Gynura cusimbua (D. Don) S. Moore	100%
10	牛毛毡	Heleocharis yokoscensis (Franch. et Savat.) Tang et Wang	100%
11	狗尾草	Setaria viridis (L.) Beauv.	100%
12	白茅	Imperata cylindrica (L.) Beauv.	100%
13	白蒿	Arteimiaisia sieuersiana Ehrhart ex Willd	100%
14	皱叶酸模	Rumex crispus L	98.8%
15	益母草	Leonurus artemisia (Lour.) S. Y. Hu in Sourn.	99.8%
16	紫花苜蓿	Lucerne/Alfalfa	90.3%
17	细叶鸢尾	Iris tenuifolin Pall.	83.3%
18	艾蒿	Artemisia arjyi	100%
19	芍药	Paeonia lactifiora	95.8%
20	芦苇	Phragmites communis	98.5%
21	芨芨草	Achnatherum splendens	98.5%
22	苍耳	Xanthium sibiricum	99.4%
23	苜蓿	Medicago Linn.	93.8%
24	苦苣	Cichorium endivia L.	99.1%
25	苦豆子	Sophora alopecuroides L.	91%
26	茅草	Gramineae	100%
27	荠菜	Capsella bursa-pastoris (Linn.) Medic.	100%
28	莲	Nelumbo nucifera	95.1%
29	葶苈子	Semen Lepidii	100%
30	蒲公英	Taraxacum officinale	95.9%
31	蒿草	Artemisia	100%
32	藜	Chenopodium album	98%
33	藿香	Agastache rugosa (Fisch. et Mey.) O. Ktze.	98.2%
34	车前	Plantago asiatica	95.7%
35	野草	\	97.5%
36	野菊花	Cyrysanthemum indicum	90.6%
37	针茅	Stipa capillata Linn.	100%
38	长芒草	Stipa bungeana Trin.	100%
39	马蔺	Iris ensata	98.1%
40	鸡冠花	Celosia cristata L	100%
41	麦冬	Ophiopogon japonicus (Linn. f.) Ker-Gawl.	41.7%
42	龙葵	Solanum nigrum Linn.	100%

表 8　虫鸟两栖动物样本实有率

Table 8　Integrity of insects, birds, and amphibious animals

序号	物种名	拉丁文学名	实有率
1	八哥	Acridotheres cristatellus	83.3%
2	喜鹊	Pica pica	100%
3	四声杜鹃	Cuculus micropterus	98.5%
4	大杜鹃	Cuculus canorus bakeri	97.7%
5	大雁	Anser anser	92.6%
6	家燕	Hirundo rustica	99.7%
7	戴胜	Upupa epops	98.4%
8	杜鹃	Cuculidae	97.8%
9	楼燕	Apus apus	100%
10	蚱蝉	Cryptotympana atrata	99.5%
11	蛇	Serpentiformes	100%
12	蛙	Anura	98.7%
13	蜜蜂	Apoidea	57.1%
14	蝴蝶	Rhopalocera	100%
15	蟋蟀	Gryllulus	99.6%
16	蟾蜍	toad	99.8%
17	豆雁	Anser fabalis	96.6%
18	赤麻鸭	Tadorna ferruginea	100%

处理后的草本植物样本实有率见表 7，虫鸟两期动物样本实有率见表 8。

如图 3 为中国动植物自然物候观测数据集各子集的样本量空间分布，数据集观测站点分布覆盖我国华中、华南、华东、华北、西南与西北部分地区。不同物种的每年观测记录记为一次观测样本，同站的木本植物观测样本量略多余其他两个子集。因为数据预处理过程中剔除数据不规范的观测样本，而虫鸟两栖动物和部分草本植物此类问题严重，导致草本植物和虫鸟两栖动物的观测站点数低于木本植物的观测站点数。从空间分布来看，三类物种的观测样本量以黄河流域为峰值向南北两侧递减，东部地区观测样本量更多。

3　北京地区木本植物物候对气候变化的响应

气温是影响我国木本植物物候的主要气象因子（张福春, 1995）。20 世纪 80 年代以后，华北地区春季物候期提前（郑景云等, 2003），北京地区秋季物候有推迟趋势（徐雨晴等, 2005; 仲舒颖等, 2008）。本节以北京地区两个站点（40.38°N, 116.83°E）和（39.93°N, 116.63°E）的木本植物的观测资料为基础，统计当地木本植物物候期变化趋势，再利用日平均气温数据统计当地年积温变化趋势，分析植物对气候变化的响应程度。按观测物种的开花和展叶先后顺序，分为先开花组：玉兰、旱柳、杨树和

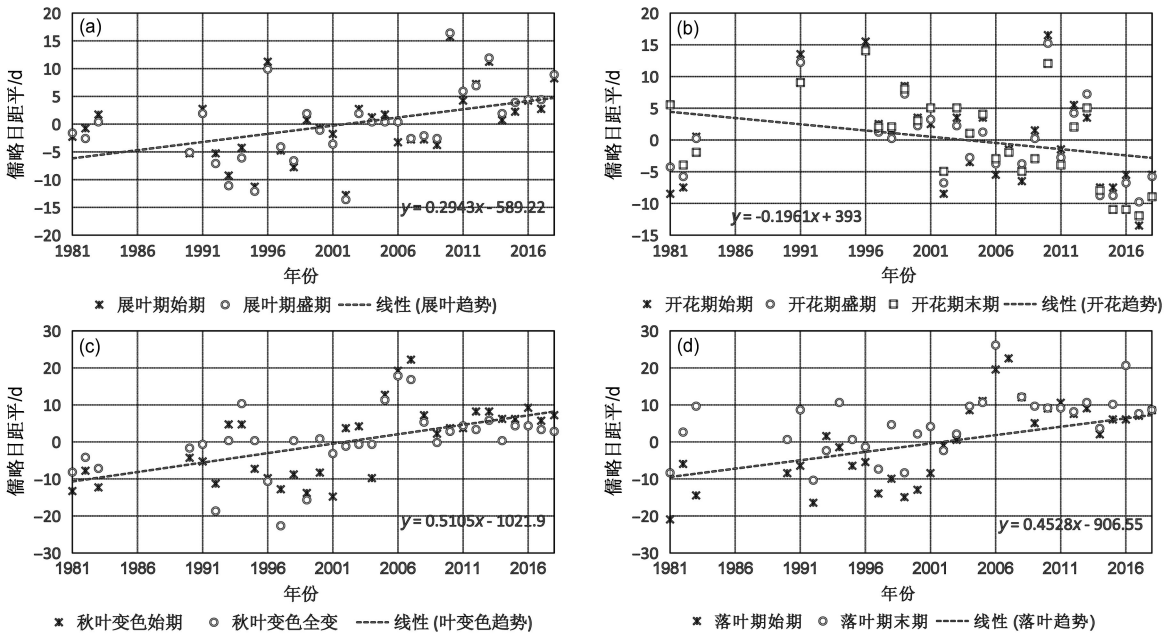

图 5　1981～2018 年北京地区玉兰、杨树、旱柳（a）展叶期、（b）开花期、（c）变色期、（d）落叶期距平与变化趋势

Fig. 5　Phenological phase anomalies and variation trends of *Magnolia denudate*, *Salix matsudana*, and *Populus davidiana* in (a) leaf expansion, (b) flowering, (c) leaf coloring, and (d) leaf fall in Beijing during 1981−2018

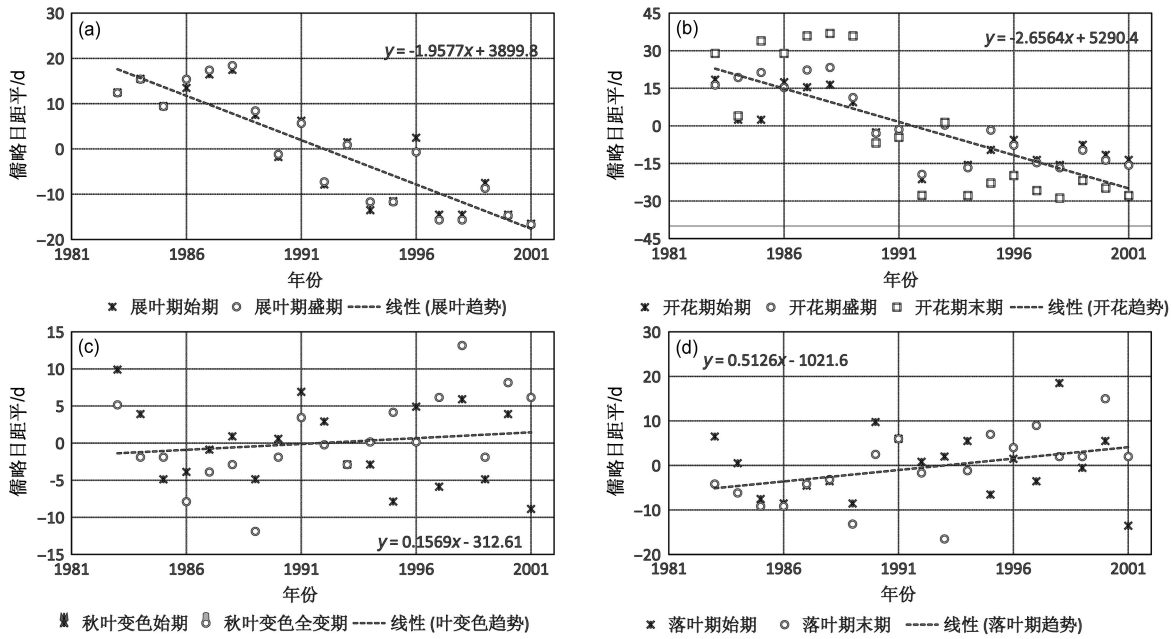

图 6 1981～2002 年北京地区枣树、槐树和榆树（a）展叶期、（b）开花期、（c）变色期、（d）落叶期距平与变化趋势

Fig. 6 Phenological phase anomalies and variation trends of *Ziziphus jujuba*, *Sophora japonica*, and *Ulmus pumila* in (a) leaf expansion, (b) flowering, (c) leaf coloring, and (d) leaf fall in Beijing during 1981−2002

先展叶组：榆树、枣树、槐树分开讨论近 30 年来北京地区木本植物的物候变化趋势。以 1 月 1 日为起点计算各物候期的儒略日距平序列，其中展叶始期、盛期表示展叶期，开花始期、盛期、末期代表开花期，叶变色始期、全变期表示叶变色期，落叶始期、末期代表落叶期。最后利用线性方程拟合物候期距平序列的平均值，得到北京地区木本植物 4 个主要物候期的变化趋势。利用同站的日平均气温数据，计算日均气温稳定≥5℃ 的年积温与积温始日、终日序列（如图 4）。从 20 世纪 80 年代中期为界，北京地区年积温先有降低趋势，后持续呈现波动增高趋势。积温始日从上世纪 80 年代中期起表现出提前趋势。

先开花组的物候期距平变化如图 5，资料时间为 1981～2018 年。展叶期、秋叶变色和落叶期都有延后趋势，延迟率分别为 2.9 d/10a，5.1 d/10a 和 4.5 d/10a。而开花期表现出微弱提前趋势，约 10 年提前 1.9 d，与趋势变化与积温始日相同。

先展叶组如图 6，资料时间为 1981～2002 年，展叶期、开花期都表现显著的提前趋势，提前率分别为 19 d/10a 和 26 d/10a，秋叶变色和落叶期有轻微延后趋势，延后率分别为 5.1 d/10a 和 4.5 d/10a，与积温终日波动延迟趋势相当。

对比两组木本植物物候期可以得知，北京地区木本植在过去 30 余年的生长期都延长，对应当地年积温的增加趋势，是木本植物对环境平均温度升高的响应表现。

4 小结与应用研究展望

以农业气象纸质年报表数字化成果（1981～2012 年）与电子农业气象年报表（2013～2018 年）为基础数据源，通过数据预处理、规范整编、质量控制、质量评估等过程，建立高质量的动植物自然物候历史长序列观测数据集。

（1）数据集分为 3 个子集，含有 42 种草本植物，111 种木本物种和 18 个虫鸟两栖动物的自然物候期观测资料，平均实有率分别是 94.8%、78.3%、95.9%。其中，木本植物因物种自生的生物特性，没有观测内容导致整体样本实有率较低，如无花果没有开花期观测。

（2）中国动植物自然物候长序列数据集有木本植物观测站 401 个，分布中国大陆 31 个省（市、自治区），草本植物观测站 231 个，虫鸟两栖动物观测站 229 个，观测样本量以黄河流域为峰值向南北两侧递减。

（3）草本植物、木本植物、虫鸟两栖动物非缺测数据的可用率中位数分别为 96.0%、87.5% 和 83.0%，整体数据质量较好。

（4）基于本产品北京地区的木本植物物候数据与同站的气温数据分析，认为近 38 年北京地区的年积温增长趋势明显，同时木本植物的生长期延长：春季物候提前，秋季物候延后。该结论与现有相关研究结论一致。

本数据集是中国气象局农业气象观测站的业务观测产物，近 40 年间虽经历过两次业务调整，数据本身仍具有一定的代表性，站点资料能反映站点所属区域的动植物物候情况。该数据集站点分布密集，每个站点观测的物种连续，适用于局地农气指导研究。数据集所含物种相对丰富，同物种在多个站点均有观测记录，适用于针对物种的地理分布研究或大范围的生物生长研究。未来将升级优化该数据集内容，补充牧草类草本植物的物候资料。

参考文献（References）

Casey A J, Daehler C C. 2018. Herbarium specimens can reveal impacts of climate change on plant phenology: A review of methods and applications [J]. Peer J, 6: e4576. doi:10.7717/peerj.4576

Fang H, Zhang Q, Buyantuev A, et al. 2015. Effects of climate change on phenology and primary productivity in the desert steppe of Inner Mongolia [J]. J. Arid Land, 7(2): 251−263. doi:10.1007/S40333-014-0042-4

高静, 刘一鸣, 任芝花, 等. 2018. 中国主要作物生长发育长序列产品的研制及应用 [J]. 气象科技进展, 8(1): 189−196. Gao J, Liu Y M, Ren Z H, et al. 2018. Establishment and application of the growth datasets of main crops in China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 8(1): 189−196. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.026

Hur J, Ahn J B, Shim K M, et al. 2014. The change of cherry first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation [J]. Int. J. Climatol., 34(7): 2308−2319. doi:10.1002/JOC.3839

Lieth H. 1975. Phenology and seasonality modeling [J]. Ecological Studies, 120(6): 461. doi:10.1097/00010694-197512000-00011

刘亚辰, 王焕炯, 戴君虎, 等. 2014. 物候学方法在历史气候变化重建中的应用 [J]. 地理研究, 33(4): 603−613. Liu Y C, Wang H J, Dai J H, et al. 2014. The application of phenological methods for reconstructing past climate change [J]. Geographical Research (in Chinese), 33(4): 603−613. doi:10.11821/dlyj201404001

马博宇, 赵常明, 葛结林, 等. 2020. 2009～2018 年神农架 17 种优势植物物候观测数据集 [J]. 中国科学数据, 5(1): 16−26. Ma B Y, Zhao C M, Ge J L, et al. 2020. A dataset of 17 dominant plants phenological observation in Shennongjia (2009−2018) [J]. China Scientific Data (in Chinese), 5(1): 16−26. doi:10.11922/csdata.2019.0043.zh

Niwattanakul S, Singthongchai J, Naenudorn E, et al. 2013. Using of Jaccard coefficient for keywords similarity [C]. Proceedings of the 2013 IAENG International Conference on Internet Computing and Web Services (ICICWS'13). Hong Kong, China, 380–384.

Parmesan C, Yohe G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. Nature, 421(6918): 37−42. doi:10.1038/NATURE01286

宋创业, 张琳, 吴冬秀, 等. 2017. 2003～2015 年 CERN 植物物候观测数据集 [J]. 中国科学数据, 2(1): 27−34. Song C Y, Zhang L, Wu D X, et al. 2017. Plant phenological observation dataset of the Chinese Ecosystem Research Network (2003−2015) [J]. Chines Science Data (in Chinese), 2(1): 27−34. doi:10.11922/csdata.180.2016.0110

Rosemartin A, Denny E G, Gerst K L, et al. 2018. USA national phenology network observational data documentation [R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2018-1060. doi:10.3133/ofr20181060

Rosenzweig C, Tubiello F N. 2007. Adaptation and mitigation strategies in agriculture: An analysis of potential synergies [J]. Mitig. Adapt. Strat. Global Change, 12(5): 855−873. doi:10.1007/S11027-007-9103-8

van Vliet A J H, de Groot R S, Bellens Y, et al. 2003. The European phenology network [J]. Int. J. Biometeorol., 47(4): 202−212. doi:10.1007/s00484-003-0174-2

宛敏谓, 刘秀珍. 1979. 中国物候观测方法 [M]. 北京: 科学出版社, 25, 40. Wan M W, Liu X Z. 1979. The Observation Method of Phenolohogy in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 25, 40.

Wang H J, Dai J H, Zheng J Y, et al. 2015a. Temperature sensitivity of plant phenology in temperate and subtropical regions of China from 1850 to 2009 [J]. Int. J. Climatol., 35(6): 913−922. doi:10.1002/JOC.4026

Wang H J, Ge Q S, Dai J H, et al. 2015b. Geographical pattern in first bloom variability and its relation to temperature sensitivity in the USA and China [J]. Int. J. Biometeorol., 59(8): 961−969. doi:10.1007/S00484-014-0909-2

徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 2005. 近 50 年北京树木物候对气候变化的响应 [J]. 地理研究, 24(3): 412−420. Xu Y Q, Lu P L, Yu Q. 2005. Response of tree phenology to climate change for recent 50 years in Beijing [J]. Geographical Research (in Chinese), 24(3): 412−420. doi:10.3321/j.issn:1000-0585.2005.03.010

徐韵佳, 戴君虎, 王焕炯, 等. 2015. 1985～2012 年哈尔滨自然历主要物候期变动特征及对气温变化的响应 [J]. 地理研究, 34(9): 1662−1674. Xu Y J, Dai J H, Wang H J, et al. 2015. Variations of main phenophases of natural calendar and analysis of responses to climate change in Harbin in 1985−2012 [J]. Geographical Research (in Chinese), 34(9): 1662−1674. doi:10.11821/d1yj201509005

张福春. 1995. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响 [J]. 地理学报, 50(5): 402−410. Zhang F C. 1995. Effects of Global warming on plant phenolohogical events in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 50(5): 402−410. doi:10.1088/0256-307X/12/7/010

张凤华, 任岗, 孙自武. 2011. 新疆玛纳斯河流域 50 年来气候变化及其对木本植物物候期的影响 [J]. 气候与环境研究, 16(6): 767−773. Zhang F H, Ren G, Sun Z W. 2011. Climate change during the

past 50 years and its impact on phenophase of woody plants in Manas Rivervalley,Xinjiang[J].ClimateandEnvironmentalResearch,16(6):767−773. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.06.11

张强, 赵煜飞, 范邵华. 2016. 中国国家级气象台站小时降水数据集研制 [J]. 暴雨灾害, 35(2): 182−186. Zhang Q, Zhao Y F, Fan S H. 2016. Development of hourly precipitation datasets for national meteorological stations in China [J]. Torrential Rain and Disasters, 35(2): 182−186. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.02.011

张琳, 李彤, 宋创业, 等. 2020. CERN 植物物种名录数据集 [J]. 中国科学数据, 5(1): 2−9. Zhang L, Li T, Song C Y, et al. 2020. A plant species list dataset of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) [J]. China Scientific Data, 5(1): 2−9. doi:10.11922/csdata.2019.0051.zh

郑景云, 葛全胜, 赵会霞. 2003. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应研究 [J]. 中国农业气象, 24(1): 28−32. Zheng J Y, Ge Q S, Zhao H X. 2003. Changes of plant phenological period and its response to climate change for the last 40 years in China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 24(1): 28−32. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2003.01.009

中国气象局. 1993. 农业气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 68. Chines Meteorological Administration. 1993. The Specification for Agrometeorological Observation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 68.

仲舒颖, 郑景云, 葛全胜. 2008. 1962～2007 年北京地区木本植物秋季物候动态 [J]. 应用生态学报, 19(11): 2352−2356. Zhong S Y, Zheng J Y, Ge Q S. 2008. Dynamics of autumn phenophase of woody plants in Beijing region in 1962−2007 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 19(11): 2352−2356. doi:10.13287/j.1001-9332.202002.101